MIKROMORPHOMETRISCHE UNTERSUCHUNGEN AN HOHLRÄUMEN IM BODEN *

(MIT BEISPIELEN DER STRUKTURVERBESSERUNG EINES TROPISCHEN BRAUNLEHMS DURCH MULCHEN)

von

W. KUBIENA, W. BECKMANN und E. GEYGER

Einleitung

Die von den Verfassern entwickelte Methodik der mikromorphometrischen Strukturanalyse des Bodens befaßte sich bezüglich der Bodenhohlräume bisher vor allem mit der photometrischen Erfassung des Hohlraumgehaltes sowohl im Gesamtgefüge als auch in einzelnen, strukturell verschieden artigen Teilzonen. Dabei erlaubt die Methode nicht nur die Bestimmung von Mittelwerten, sondern auch der Heterogenität einer Bodenstruktur (6, 7, 8). Die von uns bei jeder Auswertung benutzten Strukturphotogramme gestatten zugleich, die Morphologie von Aggregat— und Hohlraumtypen qualitativ und quantitativ zu erfassen.

Die mannigfachen Möglichkeiten einer solchen quantitativen Auswertung von Bodendünnschliffen wurden früher schon gezeigt (1, 2); dabei wurde besonders darauf hingewiesen, daß unsere Auswertungsmethodik gerade auch bezüglich Größe, Form und Verteilung der natürlichen Hohlräume des Bodens neue Untersuchungsmöglichkeiten mit sich bringt. Die Methode unterscheidet sich von anderen besonders dadurch, daß bei diesen quantitativen Bestimmungen Unterschiede in der natürlichen Morphologie der Untersuchungsobjekte mitberücksichtigt werden können.

In den folgenden quantitativen Hohlraumuntersuchungen soll die Art der Mikromorphologie der Hohlräume besonders berücksichtigt werden; vor allem wird auf die in der Längserstreckung stark wechselnde

---

(*) Por la importancia que ofrece el trabajo del Prof. Kubiena, al final del mismo se incluye un amplio resumen en castellano.

Breite der Hohlräume eingegangen werden. Darüber hinaus wird die Möglichkeit einer mikromorphometrischen Ermittlung der «inneren Oberfläche» einer Bodenstruktur aufgezeigt; durch diese Methode können die mechanisch-physikalischen Methoden zur Ermittlung dieses Wertes gemäß der von Lundegard geäußerten Forderung nach einer «mehr direkten Bestimmung» der inneren Oberfläche des Bodens in vorteilhafter Weise ergänzt werden.

Methodik

Die Methoden der photogrammetrischen Strukturanalyse wurden bereits beschrieben und einige Auswertungsergebnisse mitgeteilt (6, 7, 8). Mit Hilfe einiger neuer Geräte, die z.T. von uns entwickelt wurden,

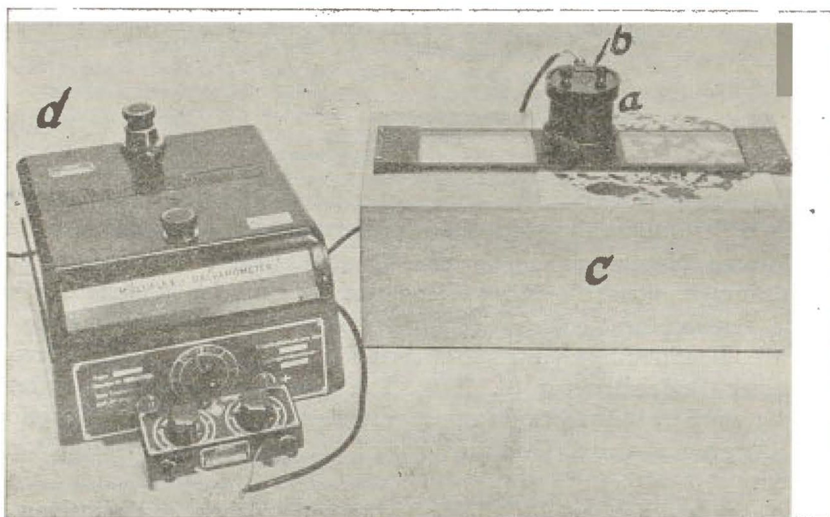
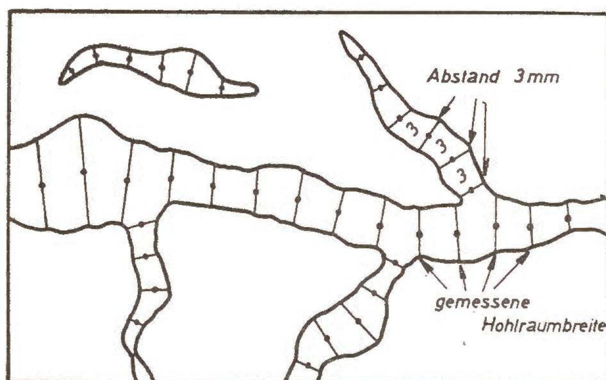


Abb. 1.—Detailphotometer. a, Meßtubus; b, Photoelement; c, Lichtkasten; d, Multiflex-Galvanometer.

konnte diese Methode für die Analyse der Bodenhohlräume weiter ausgebaut werden. Ein Gerät zur photometrischen Flächenmessung wurde früher beschrieben (6), eine andere Veröffentlichung (5) gibt eine Abbildung des Gerätes wieder. Mit diesem sog. «Gesamtphotometer» werden unsere Strukturphotogramme, die die Bodenstruktur in Schwarz-Weiß-Abbildungen wiedergeben, als Ganzes erfaßt. Da aber schon in einem Photogramm häufig bereits verschiedene Strukturtypen nebeneinander auftreten, schien eine differenzierte Auswertung interessant. Dies kann mit dem Gesamtphotometer nur mit Hilfe mehrerer Serien von Strukturphotogrammen höherer Vergrößerungen geschehen. Dagegen gestattet das neu entwickelte «Detailphotometer» die photometrische

Bestimmung schon an kleineren Ausschnitten der Struktuphotogramme. Dieses Detailphotometer wird in *Abb. 1* gezeigt.

Das Photogramm wird bei diesem — wie schon beim Gesamtphotometer — mit diffusem Licht von unten durchleuchtet. Die durchleuchtete Partie hat hier aber nur einen Durchmesser von 6 cm. Darüber befindet sich der Meßtubus (a), der den gleichen Durchmesser und eine Höhe von 8 cm hat. Er ist oben durch ein Photoelement verschlossen (b). Die Meßfläche des Elements kann durch Blenden variiert werden. Das Photoelement nimmt die durch den jeweiligen Photogrammausschnitt fallende Lichtmenge auf; diese ist abhängig vom Anteil schwarzer bzw. weißer Flächen des Ausschnitts. Die vom Photoelement aufgenommene Lichtmenge wird registriert durch ein ebenfalls neu verwendetes Meßgerät, das Multiflex-Galvanometer (Dr. B. Lange, Berlin (d)).



Skizze 1.—Schematische Darstellung der Hohlraumbreitenermittlung auf den Photogrammen.

Es zeichnet sich durch gute O-Punkt-Konstanz, hohe Empfindlichkeit und große Ablesegenauigkeit aus.

In Fällen, besonders bei mehr homogenen Bodenstrukturen, wo nicht die Heterogenität der Gesamtstruktur im Mittelpunkt der Unterschung steht, sondern spezielle Fragen etwa der Form oder der Länge und Breite von Hohlräumen, hat das Detailphotometer zudem den Vorteil, daß man sich einen Überblick über den Gesamthohlraumgehalt mit einer weit geringeren Zahl von Strukturphotogrammen verschaffen kann. Die erforderlichen 30 Messungen sind schon mit 6-8 Protogrammen zu erreichen. Um bei parallelen Struktur— und Mineralphotometer Markierungen zur Führung der Bilder angebracht. Die bei den folgenden Untersuchungen angeführten Werte von fester Bodensubstanz bzw. Hohlraumanteil sind mit Hilfe des Detailphotometers ermittelt worden.

Zur Bestimmung der Hohlraumbreiten benützen wir den Teilchengrößenanalysator nach Endter (Firma C. Zeiß). Das Gerät ist in *Abb. 2* dargestellt. Auch für diese Messungen können die Strukturphotogram-

me verwendet werden. Das zu messende Photogramm wird auf den Tisch des Teilchengrößenanalysators gelegt, dann ein Hohlraum über den Lichtkreis (a) gebracht, dessen Durchmesser der Breite des Hohlraumes an dieser Stelle angeglichen, danach diese Breite auf einem ihr zugeordneten Zählwerk (mittels einer Fußtaste) registriert. Um den Wechsel der Hohlraumbreiten in der Längsausdehnung der Hohlräume zu erfassen, wurde die Hohlraumbreite alle 3 mm gemessen (vgl. Skizze 1).

Der Teilchengrößenanalysator unterteilt die zu untersuchenden Hohlräume mit 48 Zählwerken in 49 Breitenfraktionen; diese werden — unter Berücksichtigung der jeweils vorliegenden Vergrößerung der Photogramme — in mehreren größeren Gruppen zusammengefaßt. Dabei ist die von Odén vorgeschlagene Einteilung der Porengrößen benutzt worden (*Tabelle 1*). Die gewonnenen Meßwerte geben Kenntnis von der

TABELLE 1

Einteilung der Hohlraumbreiten (nach ODÉN *1957)*

in μ	
2000 — 1000	«Grobporen» nach ODÉN
1000 — 500	
500 — 200	
200 — 100	«Mittelporen» nach ODÉN
100 — 50	
50 — 20	
20 — 10	«Feinporen» nach ODÉN
10 — 5	
5 — 2	

Hohlraumbreitenfrequenz, d.h. von der Häufigkeit der vorliegenden Hohlraumbreiten entlang der Hohlräume.

Zur Ermittlung der *inneren Oberfläche* wird an den Strukturphotogrammen die Länge der Grenzlinien zwischen Hohlräumen und fester Bodensubstanz bestimmt. Dazu dient ein Distanzrädchen, das eine genügend große Genauigkeit besitzt. Naturgemäß werden mit steigender Vergrößerung der Strukturphotogramme immer feinere Umrißlinien erfaßt *). Die Meßwerte deuten nach Umrechnung auf eine Einheit des

(*) Eine Darstellung der Oberflächengrößen in Abhängigkeit vom Abbildungsmaßstab wird in einer gesonderten Veröffentlichung erfolgen.

Bodenvolumens auf die innere Oberfläche der untersuchten Probe hin. Dabei ist der in der benutzten Vergrößerung jeweils erfaßte Hohlraumgrößenbereich stets mit anzugeben. Bei den folgenden Untersuchungen werden die Umrißlinien aller Hohlräume zwischen 20 μ und 1000 μ Breitenausdehnung gemessen; die Oberflächenangaben umfassen also die Grenzflächen dieser Hohlräume.

Untersuchungsbeispiele

Vergleichende Untersuchungen an Tropenböden ließen erkennen, daß sogenannte typische Braunlehme in immerfeuchten Gebieten zu jenen



Abb. 2.—Teilchengrößenanalysator. a, Lichtkreis mit veränderlichem Durchmesser; b, Handrad zur Veränderung des Lichtkreises; c, Zählwerke; d, Markierungsstift (markiert die vermessene Stelle).

Bodenbildungen gehören, auf denen sich die gefürchtete Fusarium-Welke (Panama disease) der Bananen besonders rasch entwickelt und zu Totalschäden führt. Dies hängt mit ihrer starken Neigung zu Staunässe und Luftarmut in den Feuchtperioden zusammen, die wiederum durch ihre unstabile, zu völliger Dichtschlämmung tendierenden Bo-

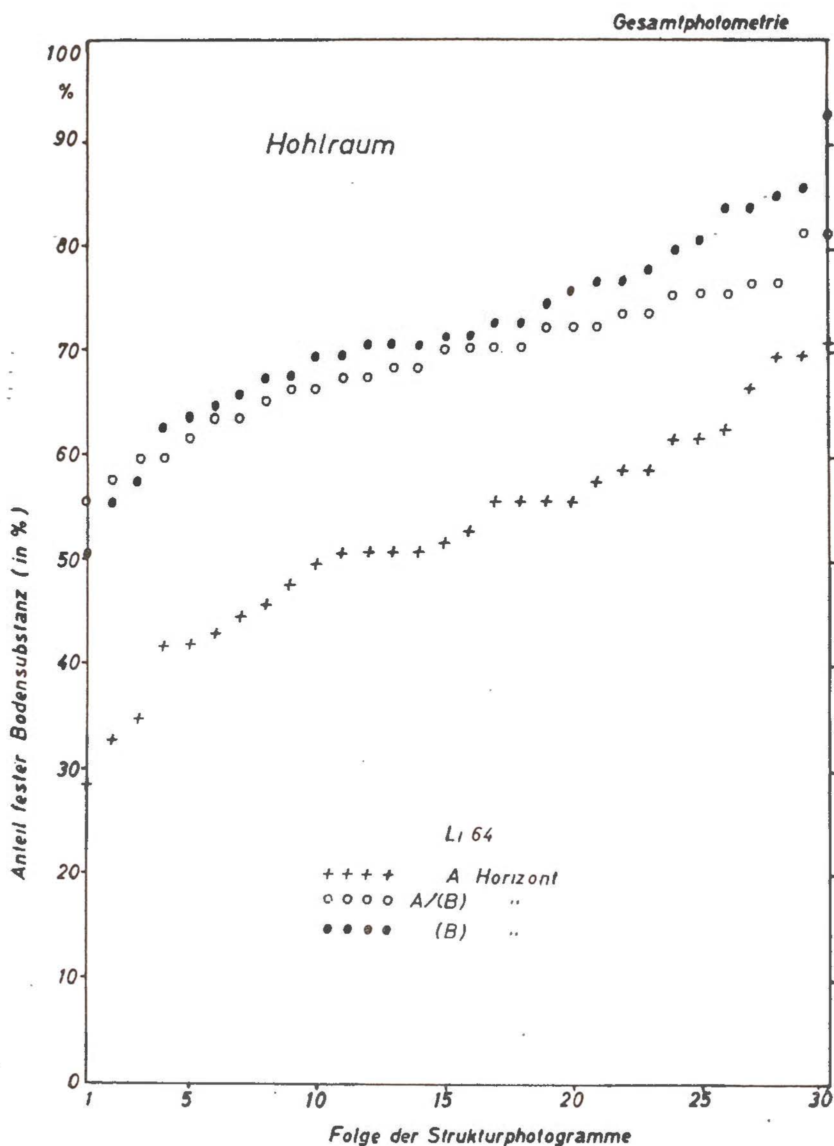


Diagramm 1.

Wertefolge der photometrischen Ermittlung des Hohlraumgehaltes aus je 30 Messungen in drei untersuchten Horizonten: Braunlehm Sinoe-Bogen, Liberia.

denstruktur weitgehend bedingt wird. Vergleichende mikromorphologische Untersuchungen an Dünnschliffen ließen erkennen, daß selbst in immerfeuchten Klimagebieten durch erhöhte biologische Tätigkeit dieser

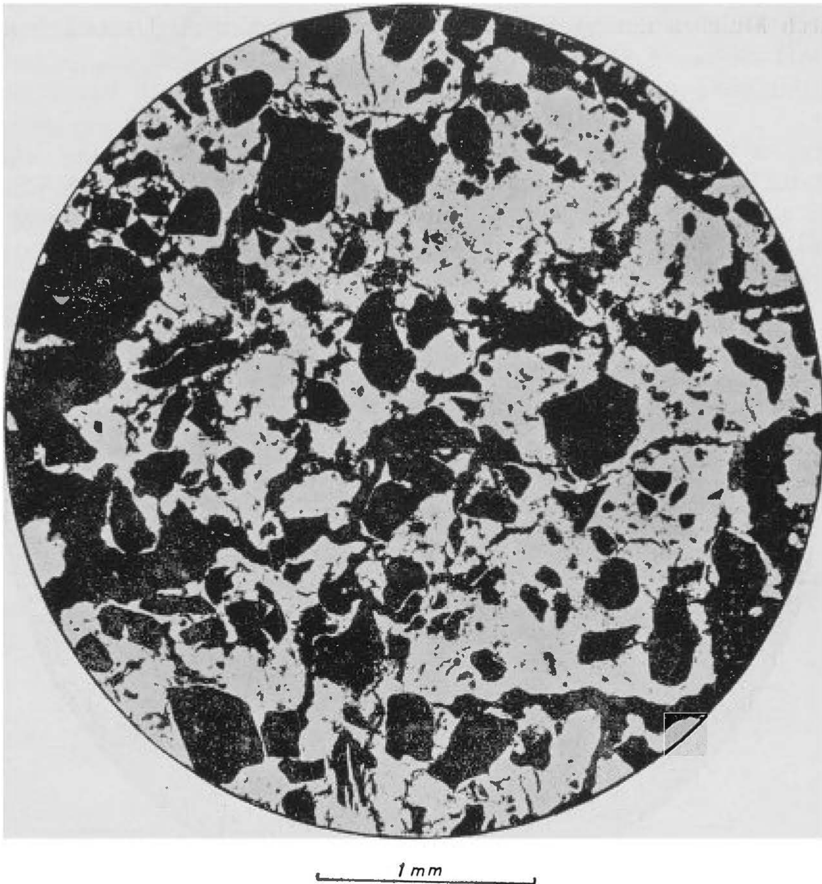
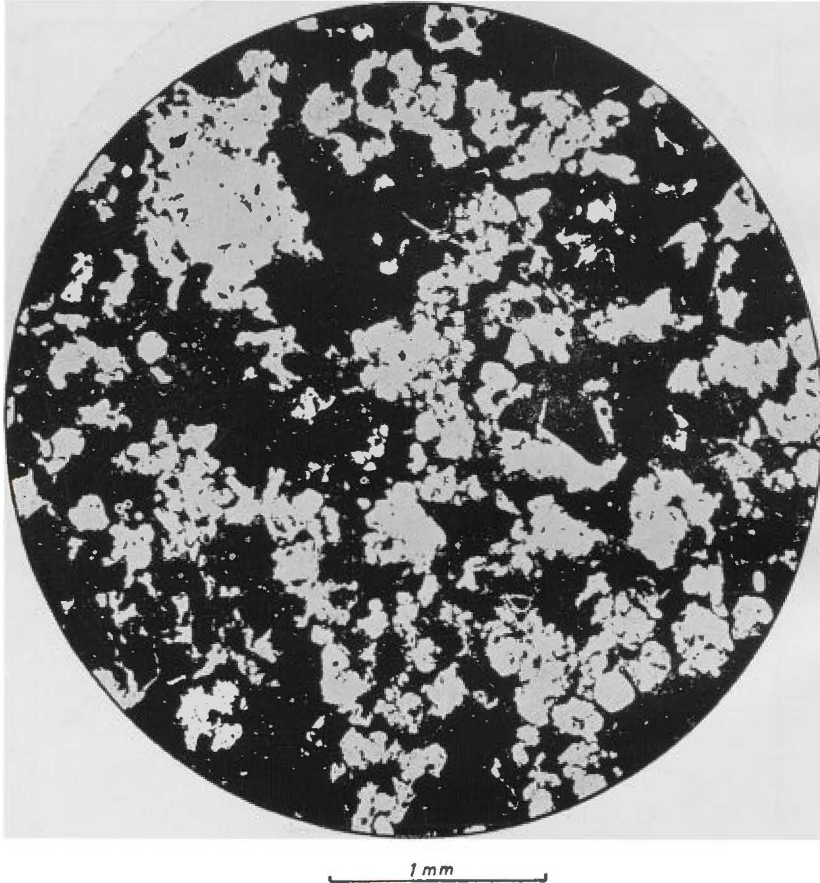


Abb. 3.—Strukturphotogramm aus dem (B)—Horizont eines Braunlehms der Sinoe—Pflanzung bei Greenville, Liberia. Dichtes Braunlehmgefüge mit großen zusammenhängenden Komplexen fester Bodensubstanz. Die Struktur wird gegliedert durch wenige große leicht gekrümmte glattwandige Schwundrisse, die sich im feuchten Zustande schließen. Die schwarzen kantigen Elemente sind keine Hohlräume, sondern Mineralkörner, die durch eine gesonderte Bestimmung an zusätzlichen, mit Hilfe von synchrom rotierbaren Polarisatoren hergestellten Spezialphotogrammen quantitativ erfaßt (7) und der festen Substanz zugerechnet werden.

zumeist oligotrophen, durch spärliche und einseitige Organismenbesiedlung charakterisierten Bodenbildungen eine deutliche Strukturverbesserung bewirkt wird, das Gefüge eines dichten bolusartigen Braunlehms verwandelt sich unter deutlicher Flockung der amorphen Eisenoxydhy-

drats in das eines aggregatreichen erdigen Braunlehms. In der Sinoe-Pflanzung der Afrikanischen Fruchtkompanie bei Greenville, Liberia, hat M. Appenzeller eine Reihe unveröffentlichter Versuche zur künstlichen Belebung der biologischen Tätigkeit solcher dichter Braunlehme durch Mulchen durchgeführt. In folgendem werden als Untersuchungs-



1 mm

Abb. 4.—Strukturphotogramm aus dem A-Horizont des Braunlehms der Sinoe-Pflanzung, Greenville, Liberia, Sehr lockere und hohlraumreiche Struktur vorwiegend löse oder leicht verbundene Aggregate, meist rauhflächige Bröckel (links oben), in der Mitte und unten vorwiegend Krümel.

beispiele zur vorliegender Veröffentlichung die Ergebnisse der mikromorphometrischen Untersuchung an 1960 von W. Kubiena genommenen Rahmenproben eines 1959 gemulchten Braunlehms im Sinoe-Boger angeführt. Die Untersuchungsbeispiele beziehen sich auf den (B)-Horizont aus 50-54 cm, auf den A-Horizont aus 0-4 cm und auf den A/(B)-Horizont aus 20-24 cm Tiefe.

Das Strukturphotogramm in *Abb. 3* zeigt die dichte Bodenmasse des *(B)-Horizontes* mit fast fehlender Aggregatbildung. Die Umrißformen der spärlichen Aggregatkomplexe sind glattflächige Bröckel. Der Strukturaufbau wird im wesentlichen durch die Hohlraumform bestimmt, bei der gekrümmte glattwandige Schwundrisse überwiegen. Sie durchziehen in wechselnder Breite die kompakte Bodensubstanz. Die Form der Hohlräume deutet darauf hin, daß die Bodenmasse bei starker Durchfeuchtung so gut wie hohlraumfrei sein wird.

Der photometrisch ermittelte Hohlraumgehalt ist hier 27 % (vgl. *Tabelle 2*). Die Werte streuen schwach, jedoch ist hier keine Häufung der Werte im mittleren Bereich zu beobachten, so daß die Steigung der Wertefolge weit größer ist als im folgenden A/(B)-Horizont (*Diagramm 1*).

Das *Diagramm 2* gibt die Hohlraumbreiten an. In diesem Horizont überwiegt der Häufigkeit nach im lufttrockenem Zustand die Breite von 50-100 μ, der Unterschied zu den anderen Fraktionen ist aber weit größer als in den oberen Horizonten. Die Berechnung der Flächenanteile der einzelnen Breitenfraktionen ergibt, daß Hohlräume mit der Breite von 100-200 μ überwiegen, gefolgt von jenen mit der Breite von 50-100 μ; alle anderen Fraktionen treten dagegen weit zurück, die größte fehlt sogar vollständig.

Die innere Oberfläche beträgt im (B)-Horizont 59 cm^2/cm^3 und ist damit noch um etwa 5 % geringer als im A/(B)-Horizont und um etwa 25 % geringer als im A-Horizont (vgl. *Tabelle 3*).

TABELLE 2

Photometrisch ermittelter Hohlraumgehalt

Braunlehm Sinoe-Bogen Liberia	A-Horizont	A/(B)-Horizont	(B)-Horizont
Mittel	47,1 %	29,6 %	27,0 %
Maximum...	71,0 %	44,0 %	49,0 %
Minimum	29,0 %	2,0 %	7,0 %

Die *Abb. 4* zeigt ein Strukturphotogramm des durch Mulchen am stärksten beeinflußten *A-Horizontes*. Obwohl dieser gewöhnlich im Strukturtypus gegenüber dem (B)-Horizont keine allzugroßen Unterschiede zeigt, liegt bei dem Versuchsboden eine außerordentlich lockere und hohlraumreiche Strukturform vor. Die feste Bodensubstanz hat sich in lose oder nur wenig vorhandene Aggregate von verschiedenster Form und Größe aufgegliedert. Hohlräume in Form von Schwundrissen treten vollständig zurück. Die zahlreichen Mineralkörner — vorwiegend Quar-

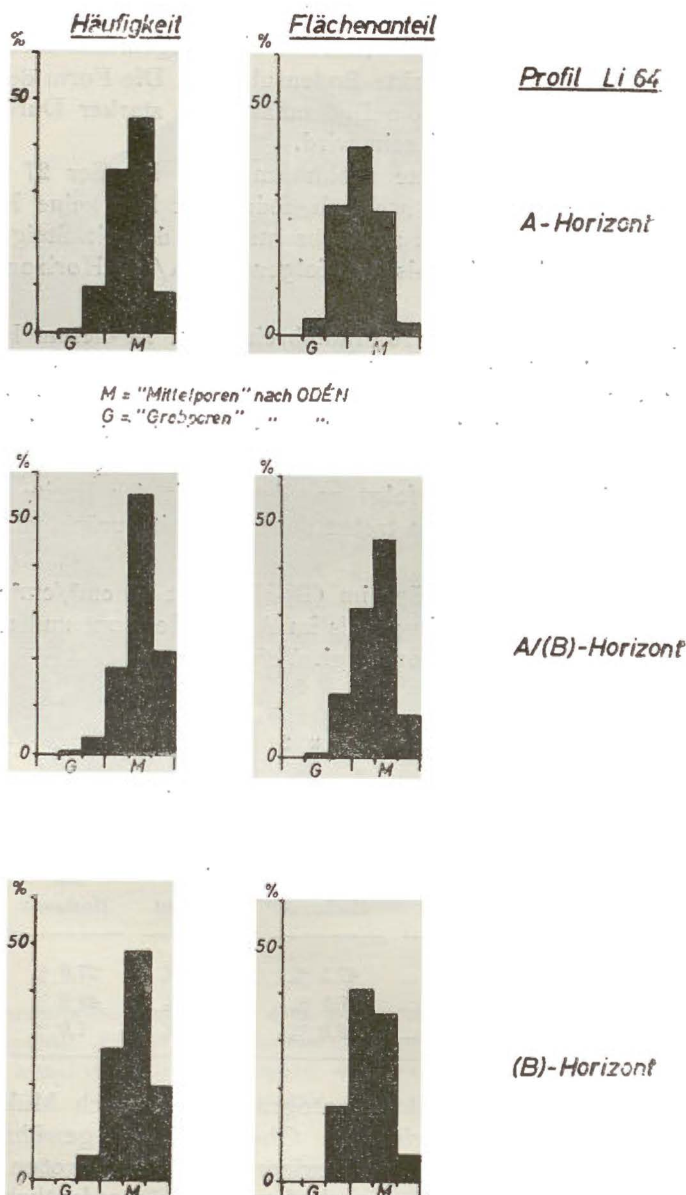


Diagramm 2.

Graphische Darstellung der Hohlraumbreiten, zusammengefaβt in Gruppen nach ODÉN, Braunlehm Sinoe-Bogen, Liberia.

ze — sind z.T. mit in die Aggregate eingebaut, liegen aber auch häufig lose und sind dann vielfach mit dünnen Hüllen versehen. Mehrere Aggregattypen sind zu unterscheiden: Die größeren zusammenhängenden Aggregate sind z.T. als rauhflächige Bröckel (*Abb. 4* links oben) mit sehr dichter Innenstruktur, z.T. aber auch schon als Krümel zu bezeichnen. Auffällig sind außerdem die kleinen und kompliziert geformten Körper, die sich meist zu größeren Aggregatkomplexen zusammenfügen (*Abb. 4* Mitte). Hierbei handelt es sich um kleine stark gerundete Umrißformen, die häufig zu unregelmäßigen Ketten miteinander verbunden sind. In *Abb. 5* sind sie in doppelt so starker Vergrößerung gezeigt. Stadien ähnlicher Formveränderungen und Aneinanderlagerungen von

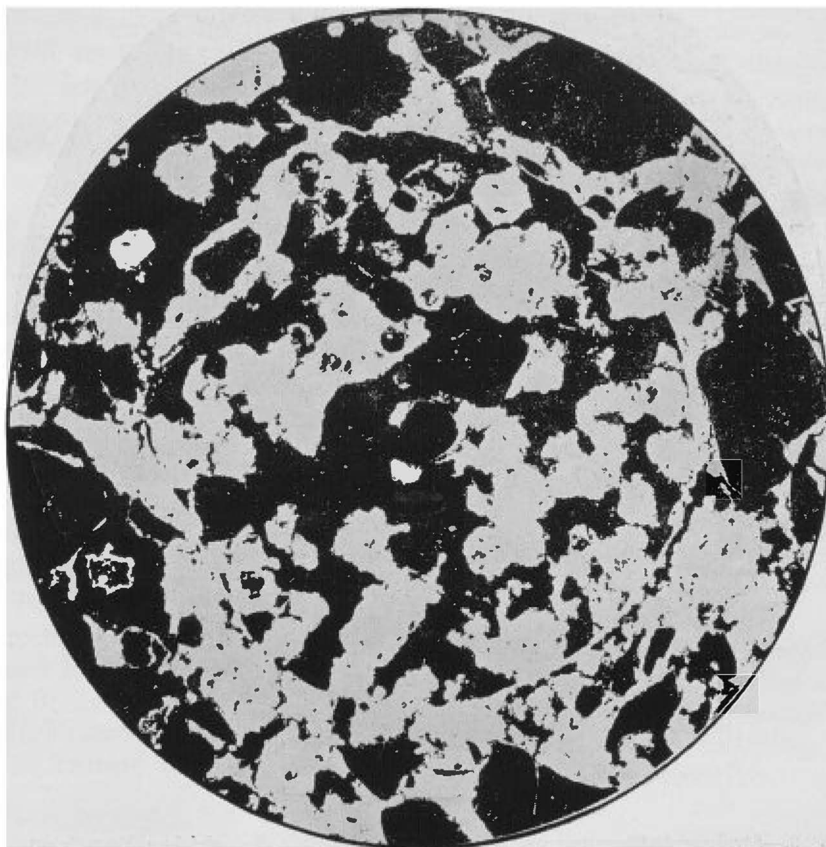


Abb. 5.—Gleiche Probe wie Abb. 4, doppelt so stark vergrößert. In der Mitte überwiegend «Schriftzeichenaggregate», die aus verklebter, mehr oder weniger verformter Kleintierlosung bestehen.

Losungsstücken können in tropischen Braunlehmen mit erhöhter biologischer Tätigkeit wiederholt beobachtet werden und sind in einer früheren Veröffentlichung (8) beschrieben worden.

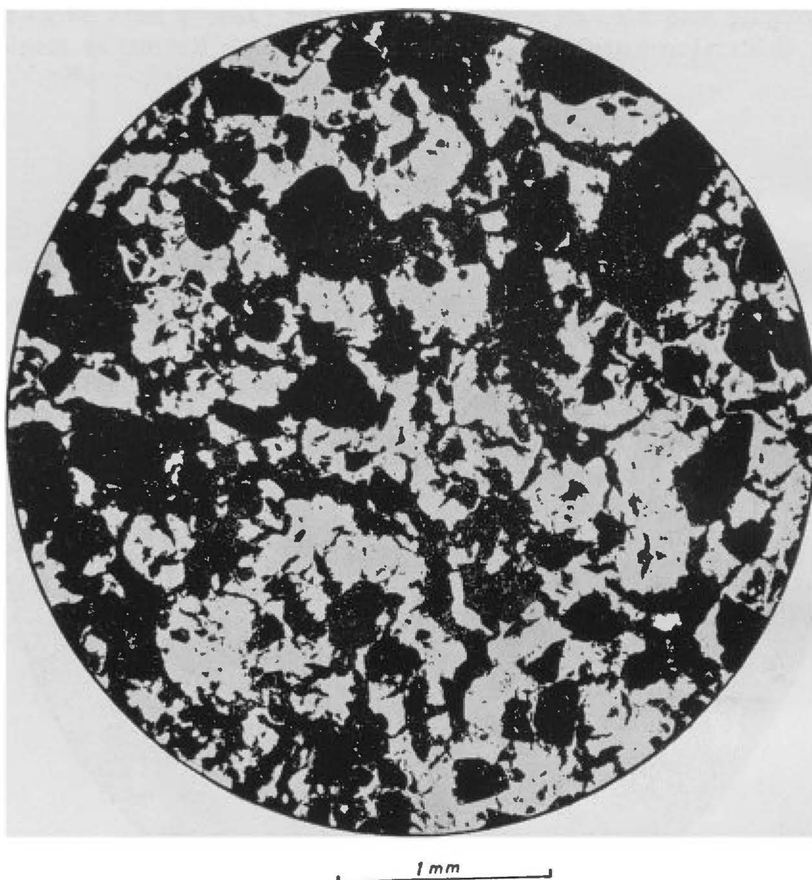


Abb. 6.—Strukturphotogramm aus dem A/(B)—Horizont des gleichen Braunlehms der Sinoe—Pflanzung, Liberia. Dichtere Struktur mit großen und zusammenhängenden Komplexen fester Bodensubstanz. Die Aggregate sind vorwiegend glatt- oder rauhflächige Bröckel; die Hohlräume sind gekrümmt rauhwandige Schwundrisse mit stark wechselnden Hohlraumbreiten.

Die Aggregate und Aggregatkomplexe bilden hier ein mehr oder weniger loses Gemenge, daher ist ein bestimmter durchgehend vorhandener Hohlraumtyp (abgesehen von den Intra-Aggregathohlräumen) nicht zu beobachten. In den größeren Komplexen fester Bodensubstanz (meist in den rauhflächigen Bröckeln) finden sich gekrümmt-rauhwandige Schwundrisse, oder (zwischen den Losungskomplexen) rauhwandig-unregelmäßige Intra-Aggregatporen.

Das *Diagram 2* gibt die am Teilchengrößenanalysator in 3000 Mes-

sungen ermittelten Hohlraumbreiten wieder. Dabei zeigt sich, daβ hier, wie im (B)-Horizont, die Hohlräume mit einer Breite von 50-100 μ am häufigsten vorkommen; es folgen solche mit 20-50 μ und 200-50 μ Breite; auch hier treten Hohlräume der gröβten Fraktion völlig zurück. Die Flächenanteile der einzelnen Fraktionen zeigen dagegen geringere Unterschiede zum (B)-Horizont: dort nehmen Hohlräume mit einer Breite von 50-100 μ den gröβten Flächeanteil ein, erst dann folgen die im A-Horizont am stärksten vertretenen Hohlräume mit 100-200 μ Breite.

Über den Gesamthohlraumgehalt und über die Verteilung von Hohlräumen und fester Substanz geben die photometrischen Messungen Auskunft. *Tabelle 2* zeigt die Mittelwerte der detailphometrischen Messungen.

Es ergibt sich ein mittlerer Hohlraumgehalt von 47,1 %. Dabei ist aber zu beachten, daβ die Einzelwerte zwischen 29 % und 71 % streuen; die graphisch dargestellte Wertefolge im *Diagram 1* zeigt also einen steilen Anstieg, die Heterogenität ist groβ.

Zur Ermittlung der Hohlraumbreitenfrequenz wurden 3000 Messungen auf einer Gesamtlänge von 180 mm der Hohlräume vorgenommen. Das *Diagramm 2* gibt die prozentuale Verteilung der Hohlraumbreiten, gruppiert nach der auf *Tabelle 1* dargestellten Skala. Es zeigt sich, daβ Hohlräume von 50-100 μ Breite am häufigsten vorkommen. 35 % des durchmessenen Hohlraums haben eine Breite von 100-200 μ. Breiten von 20-50 μ und von 200-500 μ kommen etwa gleich häufig vor, während die gröβte gemessene Fraktion von 500-1000 μ nur mit 0,7 % vertreten ist.

Berechnet man die von diesen Hohlraumabschnitten jeweils eingenommene Fläche, so ergibt ein anderes Bild (*Diagramm 2*): Hier überwiegen Breiten von 100-200 μ. Mit etwa gleichen Flächenanteilen folgen dann Hohlraumbreiten von 50-100 μ und 200-500 μ. Weder die gröβte noch die kleinste Breitenfraktion nimmt eine erhebliche Fläche ein.

TABELLE 3

Innere Oberfläche (Grob- und Mittelporen)

Braunlehm Sinoe-Borgen Liberia	A-Horizont	A/(B)-Horizont	(B)-Horizont
Innere Oberfläche in cm^2/cm^3 Boden	81	63	59

Die Länge der Grenzlinien zwischen Hohlräumen und fester Bodensubstanz beträg hier 81 cm/cm^2. Die innere Oberfläche — erfaβt wur-

den Hohlräume zwischen 20 μ und 1000 μ Breite — ergibt sich also mit 81 cm^2/cm^3 Boden (*Tabelle 3*).

- Die zweite Probe stammt aus dem A/(B)-Horizont. Das Strukturphotogramm in *Abb. 6* zeigt deutlich den Strukturunterschied zum A-Horizont. Während dort die Teile fester Bodensubstanz lose verteilt im Hohlraum liegen, zeigt sich hier eine zusammenhänge Masse, in die die Mineralkörner bereits fest eingebaut sind. Die derart zu großen Komplexen zusammengefügten Aggregate sind ihrem Typ nach als glattflächige— oder rauhflächige Bröckel zu bezeichnen, wobei hier noch die rauhflächigen überwiegen.

Im Gegensatz zum A-Horizont wird hier der Strukturaufbau durch die Hohlraumform bestimmt. Der vorherrschende Hohlraumtyp sind gekrümmt-rauhwandige Schwundrisse. Sie durchziehen in wechselnder Breite und wechselnden Abständen die ganze Struktur. Schwundrissen ist die feste Bodensubstanz dicht.

Die photometrische Auswertung (vgl. *Tabelle 2*) ergibt einen mittleren Hohlraumgehalt von 29,6 %. Dabei streuen die Einzelwerte von 2 % bis 44 %, also bedeutend weniger als im A-Horizont. Die Wertefolge der Einzelmessungen verläuft also, wie *Diagramm 1* zeigt, bedeutend flacher.

Die Länge der Grenzlinien zwischen Hohlräumen und fester Bodensubstanz ist im A/(B)-Horizont 63 cm/cm^2, die innere Oberfläche demnach 63 cm^2/cm^3, sie ist also um rund 20 % niedriger als im A-Horizont (vgl. *Tabelle 3*).

Stellt man die für die einzelnen Horizonte erzielten Ergebnisse einander gegenüber, so läßt sich sagen, daß auch durch die mikromorphometrische Analyse der Einfluß des Mulchens deutlich zum Ausdruck kommt. Gegenüber der früheren Gleichförmigkeit des Bodens im gesamten Profilbereich zeigt sich von den oberen Bodenschichten her eine erhebliche Strukturverbesserung. Der Hohlraumgehalt im oberen A-Horizont hat stark zugenommen, die Aggregat— und Hohlraumformen haben sich völlig gewandelt und zeigen nicht nur morphologisch günstigere, sondern auch stabilere Strukturbildungen. Demgemäß nimmt auch die innere Oberfläche des Bodens im Profil von oben nach unten ab. Der A/(B)-Horizont zeigt den Einfluß des Mulchens in geringerem Maße und bildet eine Übergangsschicht zu den Strukturtypen des Unterbodens.

Bezüglich der erzielten Ergebnisse ist zu berücksichtigen, daß die Werte für den strukturell sehr instabilen (B)-Horizont dadurch günstiger ausfallen, als in der freien Natur, da die Untersuchungen aus methodischen Gründen vorläufig noch bei geringeren Wassergehalten durchgeführt werden müssen als sie den Standortsverhältnissen entsprechen. Dies läßt sich bereits durch die Ermittlung der Hohlraumformen erkennen, da sie im (B)-Horizont fast ausschließlich als Schwundrißbildungen vorliegen, die sich bei höherem Wassergehalt völlig schließen, während

die Hohlraumformen des A-Horizontes sich bei Feuchtigkeitszunahme wenig verändern.

Bundesforschungsanstalt für Forst-und Holzwrtschaft, Reinbek/Hamburg, Abteilung für Bodenkunde und Forstökologie.

Zusammenfassung

In Ergänzung zu früher beschriebenen Methoden zur mikromorphometrischen Strukturanalyse des Bodens werden neue Verfahren zur Ermittlung spezieller Werte der Hohlraumanalyse mitgeteilt. Hierbei handelt es sich neben der quantitativen Erfassung der Hohlraumformen um die Bestimmung der Hohlraumbreitenfrequenz und die durch die Grenzflächen zwischen den Hohlräumen und der festen Bodensubstanz ermittelte Innere Oberfläche des Bodens. Die hier neu verwendeten Geräte, Detailphotometer und Teilchengrößenanalysator werden beschrieben.

Die Anwendung der Arbeitsmethodik wird an dem Beispiel der Strukturverbesserung durch Mulchen an Rahmenproben eines tropischen Braunlehms der Sinoe-Pflanzung bei Greenville, Liberia, vorgeführt.

Resumen

Introducción

Los autores han desarrollado un método para el estudio microfotométrico de los poros y agregados que constituyen la estructura del suelo. El método permite, no sólo el análisis de la *estructura global* del suelo, mediante la determinación de valores medios, sino que, además, permite poner de manifiesto la heterogeneidad de las estructuras edáficas cuando el método se aplica al estudio de zonas parciales (6, 7, 8). Por otra parte, los fotogramas estructurales que se utilizan en este tipo de investigaciones permiten analizar *cualitativa y cuantitativamente* la morfología de los poros y agregados del suelo, en definitiva, su estructura.

Las múltiples posibilidades de semejante valoración cuantitativa ha sido demostrada ya con anterioridad (1, 2). Se señaló entonces que nuestro método de valoración proporciona nuevas posibilidades para el estudio de las estructuras edáficas, puesto que las determinaciones cuantitativas permiten analizar *objetivamente* el tamaño, forma y distribución de los poros y agregados del suelo, con lo cual se tiene una base muy firme para la diferenciación micromorfológica de los diferentes tipos de suelo.

El método

En las investigaciones cuantitativas de la porosidad se tienen particularmente en cuenta los siguientes aspectos micromorfológicos:

Anchura de los poros y variaciones de la misma a lo largo de la sección longitudinal de aquellos.

Superficie interna del suelo expresada en cm^2/cm^3.

Forma y *dimensiones* de los agregados del suelo.

Así se pueden completar ventajosamente las técnicas físico-químicas usuales en este tipo de investigaciones, de acuerdo con la proposición formulada por ODEN acerca de «una determinación más directa».

En esencia, el método de estas investigaciones, que ha sido ya ampliamente descrito y dado a conocer (6, 7, 8), se basa en el análisis fotogramétrico, en corte del-

gado, de la estructura del suelo. Para ello se venía utilizando un «fotómetro total» (5, 6) al que recientemente se han añadido nuevos aparatos como el «fotómetro de detalle».

Con el fotómetro total se consiguen fotogramas estructurales que reproducen, en blanco y negro, la totalidad de la estructura del suelo. Pero como en un mismo fotograma es frecuente encontrar distintos tipos de estructuras, parecía interesante llegar a una determinación diferenciada de dichas estructuras; para ello se utiliza el fotómetro de detalle. Todos los valores numéricos que figuran más adelante se refieren a mediciones efectuadas con este fotómetro.

Esta determinación diferenciada de las estructuras no puede obtenerse con el fotómetro total mas que a base de varias series de fotogramas parciales y de mayor aumento que el primitivo. El fotómetro de detalle, por el contrario, permite, ya desde el principio, el análisis detallado de áreas muy pequeñas.

La técnica es muy sencilla. El fotograma se ilumina desde abajo con luz difusa. El área iluminada tiene en este caso un diámetro de 6 cm. Encima se encuentra el tubo (a) de medida que tiene el mismo diámetro y 8 cm. de altura. En su interior se encuentra una célula fotoeléctrica. La superficie sensible a la célula puede graduarse mediante diafragmas dispuestos ad hoc.

La cantidad de luz que llega a la célula depende de las manchas negras y blancas de cada área parcial estudiada y se mide con un galvamómetro multiflex (d) que se caracteriza por una gran sensibilidad, mucha exactitud en la lectura y un punto O muy constante.

En los casos de suelos con estructuras homogéneas, donde la heterogeneidad no constituye el objeto primario de la investigación, sino que interesan otros datos como la forma, la longitud o la anchura de los poros, el fotómetro de detalle tiene además la ventaja de proporcionar una visión de conjunto acerca del contenido total de poros con un número menor de fotogramas. Con 6-8 fotogramas se obtienen ya las 30 mediciones que se consideran imprescindibles para un buen análisis estructural.

Para la determinación de la anchura de los poros y su variación a través de la sección longitudinal de los mismos, se utiliza un «analizador» de partículas de la casa Zeiss representado en figura 2. El fotograma se coloca sobre la platina del analizador y el círculo de luz (a), cuyo diámetro es regulable, se adapta a la anchura del poro que queda registrada en el contador del aparato. Con el fin de ofrecer las variaciones longitudinales en la anchura de los poros se realizan mediciones cada tres mm. (figura 3).

El analizador permite diferenciar hasta 49 anchuras distintas que luego se clasifican, teniendo en cuenta la ampliación de los fotogramas, en nueve grupos, según la escala de tamaños propuesta por ODEN, tabla 1.ª.

Para determinar la superficie interior se mide en los fotogramas la longitud del contorno de las partículas de materia sólida mediante un planímetro. Normalmente, al aumentar la ampliación de los fotogramas estructurales se pueden analizar líneas de contorno cada vez más finas.

Los valores que se obtienen con este analizador, una vez convertidos a la escala de ODEN, permiten conocer, con mucha aproximación, la superficie interna por unidad de volumen en las diferentes estructuras del suelo.

SCHRIFTUM

(1) BECKMANN, W. 1962. Zur Mikromorphometrie von Hohlräumen und Aggregaten. Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde.

(2) GEYGER, E. 1962. Zur Methodik der mikromorphometrischen Bodenuntersuchung. Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde.

(3) HENNIG, A. 1958. Kritische Betrachtungen zur Volumen- und Oberflächenmessung in der Mikroskopie. Zeiss Werkzeitschrift Nr. 30 (1958).

(4) KUBIENA, W. L. 1943. L'investigation microscopique de l'humus. Z. Weltforstw. Bd. X.

(5) — — 1962. Structure and Genesis of Tropical Soils. Germany 24.

(6) — — BECKMANN, W. und GEYGER, E. 1961. Zur Methodik der photogrammetrischen Strukturanalyse des Bodens. Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde, H. 2.

(7) — —, — —, — — 1961. Die Verwendung des Tischprojektors TP 200 für die Strukturanalyse des Bodens. Leitz Mitteilungen für Wissenschaft und Technik, Bd. II.

(8) — —, — —, — — 1962. Die Untersuchung der Feinstruktur von Bodenaggregaten mit Hilfe von Strukturphotogrammen. Zeiss-Mitteilungen, Bd. 3.

(9) LUNDEGARDH, H. 1957. Klima und Boden in ihrer Wirkung auf das Pflanzenleben. Gustav Fischer Jena.

(10) ODÉN, S. 1957. Förslag till klassifikation av markporer. Kungl. Skogs Lantbr Acad. Tidskr. 96.

(11) REDLICH, G. C. 1940. Determination of soil structure by microscopial investigation. Soil Sc. 50.

(12) SWANSON, C. L. W. 1941. A microscopic method for measuring pore space and for characterizing soil structure. Doctoral Thesis Nr. 623. Extracto en: Iowa State College Journ. of Sc. Vol. XVI, No. 1.